

## Prüfvorgabe für eine Studie einer geeigneten wirtsgesteinsspezifischen Auslegungstemperatur für die Einlagerung hochradioaktiver Abfälle entsprechend StandAG

### 1 Veranlassung

Ausgehend von den Teilgebieten (TG) aus Phase I Schritt 1 des Standortauswahlverfahrens werden in Phase I Schritt 2 vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (vSU) gemäß § 14 StandAG im Form der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) nach § 27 StandAG durchgeführt. Nach § 27 Abs. 4 StandAG wird vorgegeben:

*„Solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind, wird aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 Grad Celsius an der Außenfläche der Behälter ausgegangen“*

Die Festlegung einer maximalen Temperatur ist abhängig von mineralogischen, chemischen, physikalischen und biologischen temperaturabhängigen Prozessen, welche potentielle negative Auswirkungen haben. Hinzu kommt der Aspekt der Handhabbarkeit der Abfallbehälter, hier im Wesentlichen mit Blick auf die Berücksichtigung von Rückholung und Bergung entsprechend der Vorgaben des StandAG.

Die im StandAG vorläufig festgelegte Grenztemperatur basiert auf einer Empfehlung der Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ (K-Drs. 268). Sie stellt keine maximal physikalisch mögliche Temperatur dar, sondern eine regulatorische Vorgabe, welche mit einer Vorsorge begründet wird.

Diese Vorgabe wird von verschiedenen Seiten kritisch diskutiert. Je nach Wirtsgestein und Endlagerkonzept sind Temperaturen kleiner als 100 °C nicht ausschließlich vorteilhaft für die Sicherheit (Röhlig 2017). Darüber hinaus schränkt eine Festlegung auf eine vorzeitige Grenztemperatur Optimierungspotentiale ein (K-Drs. 268, S. 507).

Die bestehende Grenztemperatur hat einen starken Einfluss auf die Standortauswahl, da sie die zu betrachtenden Endlagerkonzepte beeinflusst und somit bspw. den Flächenbedarf des Endlagers stark beeinflusst.

Ebenfalls ist diese Temperatur wichtig für die Planung und Entwicklung von Behältern im Rahmen der Endlagerkonzeptentwicklung.

Daher ist es für das Standortauswahlverfahren wichtig, dass bereits früh innerhalb des Verfahrens der Stand von Wissenschaft und Technik untersucht wird und eine Anpassung der Grenztemperatur hinsichtlich einer günstigen Temperatur erfolgt. Dies kann auch relevant sein, damit keine potentiell geeigneten Standorte vorab aus dem Standortauswahlverfahren ausscheiden.

Das vorliegende Projekt hat zum Ziel wirtsgesteinsspezifisch einen geeigneten Grenztemperaturbereich zu quantifizieren, welche bereits bei der Durchführung der rvSU zur Anwendung kommt.

## 2 Vorgehensweise

Die BGE schlägt basierend auf spezifischen als sinnvoll angesehenen Temperaturbereichen konkrete Auslegungstemperaturen<sup>1</sup> je Wirtsgestein vor (Kapitel 3). Die GRS prüft ergebnisoffen, ob die gewählten Temperaturbereiche und Auslegungstemperaturen geeignet sind. Im Falle, dass die vorgeschlagenen Temperaturen als nicht geeignet erkannt werden, schlägt die GRS konkrete abweichende Temperaturen, also eine Zahl (in °C), für das entsprechende Wirtsgestein vor. In beiden Fällen ist die Bewertung von der GRS zu begründen. Bei der Prüfung der Temperaturen sind alle relevanten Prozesse und Komponenten zu betrachten.

Langzeitsicherheit und Betriebssicherheit sind für die Betrachtung als wesentlich zu sehen. Aspekte wie Rückholung und Bergung sollen nicht als wesentliche Aspekte einbezogen werden.

Die GRS ist völlig frei bei der Bearbeitung und muss sich in keiner Weise an die von BGE vorgeschlagenen Temperaturen halten.

Ein von der GRS erarbeiteter Zwischenstand ist im Rahmen eines Workshops im Oktober 2022 geeigneten externen Expert\*innen (bspw. ESK, BGE TEC, BGE TEK-ES, BGR, DAEF, NBG) vorzustellen und zu diskutieren. Die Ergebnisse dieser Diskussion werden dokumentiert und fließen in die abschließende Festlegung mit ein.

Ein belastbares Ergebnis für konkrete Temperaturen soll unter Berücksichtigung des Stands von Wissenschaft und Technik in Form eines Abschlussberichtes bis zum 31.12.2022 vorliegen.

Weitere Abstimmungen der BGE mit den relevanten Institutionen (BASE, BMUV) vor Finalisierung sind geplant. Im Rahmen des Vorhabens sind entsprechende Austauschtermine im Herbst/Winter 2022 zu berücksichtigen.

## 3 Vorschlag für wirtsgesteinsspezifische Auslegungstemperaturen

Bei der Festlegung von Auslegungstemperaturen spielen verschiedene Aspekte eine Rolle. Diese umfassen temperaturabhängige thermische, hydraulische, mechanische, chemische und biologische (THMCB) Prozesse, die Korrosionsrate am Behälter, die Betriebssicherheit während des Einlagerungsbetriebs als auch die Handhabbarkeit der Behälter bei der Rückholung.

Im Folgenden werden auf Grundlage des aktuellen Standes der Wissenschaft, die relevantesten Aspekte jedes Wirtsgesteins dargestellt. Darauf basierend folgt der erste Vorschlag für eine Auslegungstemperatur, welcher durch die GRS geprüft werden soll.

---

<sup>1</sup> Hier und nachfolgend wird statt Grenztemperatur von Auslegungstemperatur gesprochen, da es sich hier nicht um eine ‚Grenztemperatur‘ im eigentlichen Sinne handelt, vergleiche dazu auch den Bericht (Bracke et al., 2019).

Die gewählten Temperaturen sind derartig gewählt, dass im Rahmen einer Optimierung des Endlagersystems gemäß § 12 EndlSiAnfV, beispielsweise, weil zusätzliche ortsspezifische Daten existieren, gegebenenfalls höhere Temperaturen betrachtet werden können, nicht jedoch niedrigere erforderlich werden. Es handelt sich also nicht um zulässige Maximaltemperaturen, sondern um als sinnvoll für eine Endlagerauslegung erachtete Temperaturen bzw. Temperaturbereiche.

### 3.1 Tongestein

In Bracke et al. (2019) wird schematisch die Temperaturabhängigkeit wichtiger THM/CB-Prozesse im Tongestein dargestellt (Abbildung 1). Ein wichtiger Aspekt stellt die beschleunigte Umwandlung von Mineralen, insbesondere Tonmineralen, dar. Dies kann dazu führen, dass sicherheitsrelevante Eigenschaften irreversibel beeinträchtigt werden. Hier ist bspw. die Umwandlung von Smektit zu Illit zu nennen. Da Illit weniger sorptions- und quellfähig ist, nehmen diese positiv wirkenden Eigenschaften des Tongesteins mit einer erhöhten Temperatur ab. Darüber hinaus kann es bei zunehmender Temperatur zur Expansion oder Kontraktion des erhitzten Bereichs kommen, welche die Integrität des Wirtsgesteins beeinflussen können. Positiv steht dem gegenüber eine Abnahme an mikrobieller Aktivität mit zunehmender Temperatur (Bracke et al. 2019).

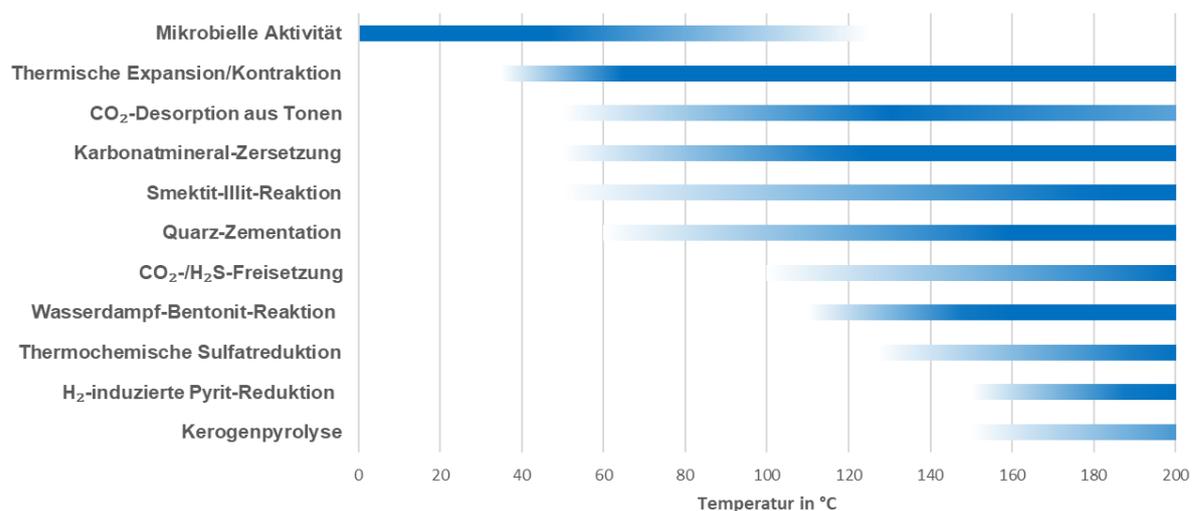


Abbildung 1: Temperaturabhängigkeit wichtiger THM/CB-Prozesse im Tongestein (aus Bracke et al. 2019)

#### 3.1.1 Internationale Vorgehensweise

In der Schweiz gibt es keine Regelungen bzgl. der Auslegungstemperatur im Gesetz oder Verordnung (Bracke et al. 2019). Es werden Temperaturen an der Behälteraußen-seite zwischen 140 – 160 °C als vertretbar angesehen (Nagra 2002).

In Frankreich werden Kenntnis zum Temperaturverhalten der Behälter und der geologischen Barriere vorgeschrieben. In einer Sicherheitsrichtlinie wird eine Temperatur kleiner als 100 °C an der Behälteraußenfläche als günstig angesehen. Jedoch wird diese

Temperatur nicht regulatorisch vorgeschrieben. Daher werden in Frankreich aktuell Temperaturen von 90 – 100 °C an der Behälteraußenseite angesetzt (Andra 2005).

In Bracke et al. (2019) wurden weitere verschiedene Internationale Auslegungstemperaturen verglichen, diese werden in Tabelle 1 dargestellt.

*Tabelle 1: Internationaler Vergleich von Temperaturen zur Endlagerauslegung im Tongestein (basierend auf Bracke et al. 2019)*

Land	Temperatur an Behälteraußenfläche	Temperatur im Buffer/Verfüllmaterial	Temperatur im Wirtsgestein
Belgien	100 °C	< 100 °C im Bentonit Erwartet: 65 – 80 °C	Erwartet: 55 – 70 °C
Frankreich	90 – 100 °C	100 °C für Bentonit	90 °C (Einlagerungskammern)
Schweiz	140 – 160 °C	125 °C (in der äußeren Hälfte des Bentonitbuffers)	70 – 95 °C an der Grenze Buffer/Wirtsgestein

Wesentlicher Grund für eine Auslegungstemperatur größer als 100 °C ist, dass eine sog. Opferschicht vertretbar ist. Also ein wenige Dezimeter mächtiger Bereich direkt an den Behältern, der einen ggf. hohen Integritätsverlust erfährt. Diese ist jedoch vernachlässigbar, da der verbleibende integre Teil der wesentlichen Barriere insgesamt noch eine ausreichende Mächtigkeit aufweist.

### 3.1.2 Vorschlag für eine Auslegungstemperatur im Tongestein

Ausgehend von einem vertretbaren Temperaturbereich zwischen 100 °C bis 150 °C im Wirtsgestein Tongestein wird folgende Auslegungstemperatur an der Außenseite des Behälters vorgeschlagen.

**Wirtsgestein Tongestein: 130 °C**

### 3.2 Steinsalz

In Bracke et al. (2019) erfolgt eine schematische Zusammenstellung aller temperaturabhängigen THMCB-Prozesse mit Blick auf Steinsalz, diese wird in Abbildung 2 dargestellt.

Generell werden für Steinsalz die thermischen Materialeigenschaften, wie eine hohe Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität, als positiv bewertet.

Darüber hinaus werden positive Effekte wie Salzkriechen und Selbstheilungseffekte durch erhöhte Temperaturen unterstützt. Ebenfalls werden mikrobielle Prozesse durch höhere Temperaturen verhindert.

Demgegenüber kann es durch eine erhöhte Temperatur zur thermischen Expansion des Wirtsgesteins kommen, was wiederum die Integrität des Wirtsgesteins beeinflussen kann.

Durch den Wärmeeintrag und Anwesenheit von Hydratsalzen (z. B. Carnallit) kann es zur Freisetzung von Kristallwasser kommen, welches als potentielles Transportmedium für Radionuklide fungieren kann und wodurch die Permeabilität erhöht werden kann (Bracke et al. 2019).

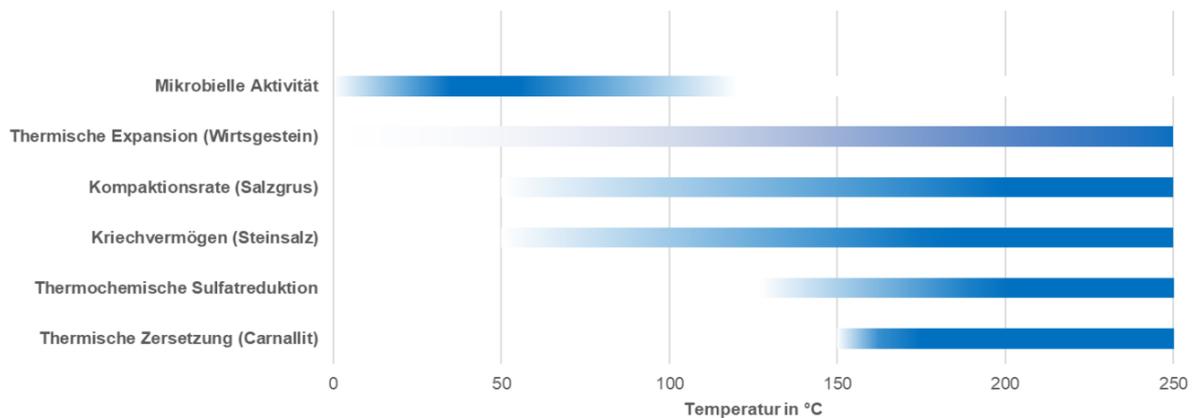


Abbildung 2: Temperaturabhängigkeit wichtiger THMCB-Prozesse im Steinsalz (aus Bracke et al. 2019)

### 3.2.1 Vorschlag für Auslegungstemperaturtemperatur

Basierend auf den Erkenntnissen aus Bracke et al. (2019) wird für Steinsalz ein Temperaturbereich zwischen 130 °C – 200 °C als möglich angesehen.

#### Auslegungstemperatur Wirtsgestein Steinsalz:

**Unter der Vorgabe, dass 80 °C am Übergang zu Hydratsalzen nicht überschritten werden sind 180 °C an der Außenseite des Behälters (Bergbau/Rückholung) erlaubt**

Der Grund für eine Temperatur von maximal 80 °C am Rand der Kaliflöze ist die Vermeidung von Carnallit-Lösung.

Die Beschränkung auf 180 °C an der Behälteraußenseite ergibt sich, um ggf. vor allem Rückholung aber auch Bergung zu erleichtern.

### 3.3 Wirtsgestein Kristallingestein

Hohe Temperaturen spielen im Wirtsgestein Kristallingestein eine besondere Rolle, da hier unterschiedliche Endlagerkonzepte möglich sind (§ 23 Abs. 4 StandAG).

Nach dem Prinzip des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sorgt das Kristallingestein selbst als wesentliche Barriere. Da Kristallingestein aufgrund seiner Genese bereits sehr hohe Temperaturen erfahren hat, sind keine sicherheitsrelevanten THCMB Prozesse zu erwarten (Bracke et al. 2019).

Im Fall, dass im Kristallingestein kein ewG ausgewiesen werden kann, kann der Behälter zusammen mit der geotechnischen Barriere (Bentonitbuffer) die wesentliche Barriere darstellen. Jegliche Schädigung des Buffers ist daher zu minimieren.

Unabhängig vom Endlagerkonzept ist es üblich, tonhaltige Materialien (wie Bentonit) als Buffer einzusetzen. Für diesen tonhaltigen Buffer gelten dieselben temperaturabhängigen Prozesse wie im Tongestein. Demnach können sich Temperaturfestlegungen im kristallinen Wirtsgestein aus den verwendeten Buffermaterialien ergeben (Bracke et al. 2019).

Dieser Buffer weist üblicherweise nur eine relativ geringe Mächtigkeit von wenigen Dezimeter auf. Er hat über das Bentonitquellen eine wesentliche Funktion für den Verschluss. Hieraus ergibt sich, dass Temperaturen die zu einer Illitisierung führen möglichst zu vermeiden sind.

Hinzu kommt das bruchhafte Verhalten von Kristallingestein auf Belastungen (Seismizität oder bspw. Gletscherauflast) welches typischerweise nur sehr gering und dann auch nur langsam durch selbstabdichtende Prozesse kompensiert wird. Hieraus ergibt sich eine besondere Bedeutung als hydraulische Sperre für den Bentonitbuffer.

### **3.3.1 Internationale Vorgehensweise**

In Schweden gibt es keine regulatorische Vorgabe hinsichtlich der Temperatur. Lediglich erfolgt die implizite Anforderung, dass barriereschädigende Temperaturen vermieden werden sollen (Bracke et al. 2019). Das Design des Endlagers gewährleistet, dass Maximaltemperaturen im Buffer  $<100\text{ °C}$  sind. Diese Temperaturgrenze dient als Prüfkriterium für die Sicherheitsfunktion „Resist transformation“ (SKB 2011).

Ähnlich zu Schweden erfolgt auch in Finnland keine regulatorische Vorgabe einer Temperatur. Es werden lediglich Anforderungen an die geotechnische Barriere und das Wirtsgestein gestellt, welche indirekt das Vermeiden von barriereschädigen Temperaturen mit umfasst (Bracke et al. 2019).

In Finnland: „The temperature at the canister surface must not exceed  $100\text{ °C}$  with respect to long-term stability of the buffer,...“ (Posiva Oy & SKB 2017).

In Bracke et al. (2019) wurden weitere internationale Auslegungstemperaturen verglichen, diese werden in Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2:** *Internationaler Vergleich von Temperaturen zur Endlagerauslegung im Kristallingestein (basierend auf Bracke et al. 2019)*

Land	Temperatur an Behälteraußenfläche	Temperatur im Buffer/Verfüllmaterial	Temperatur im Wirtsgestein
Finnland	Erwartet: 95 °C (ungesättigter Buffer) bzw. 75 °C (gesättigter Buffer)	100 °C	65 °C
Frankreich	90 °C	90 °C	100 °C
Japan		100 °C	
Kanada	~50 – 100 °C	/	/
Russland	/	100 °C	/
Schweden	<100 °C	<100 °C	/
Schweiz	126 °C	103 °C	98 °C
Südkorea	/	100 °C ggf. 125 °C	/

### 3.3.2 Vorschlag für Auslegungstemperatur

Basierend auf den Vorgehensweisen in Skandinavien wird seitens BGE folgende Auslegungstemperatur an der Außenseite des Behälters im Wirtsgestein Kristallingestein vorgeschlagen:

#### **Wirtsgestein Kristallingestein: 100 °C**

Dies gilt sowohl für den Fall, dass der sichere Einschluss nach § 4 Abs. 3 EndlSiAnfV auf einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich beruht, als auch für den Fall, dass dieser auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht.

Die zentrale Motivation hierfür ist, dass der Buffer im Kristallingestein ohne ewG eine wesentliche Barriere darstellt (EndlSiAnfV) aber auch bei Vorliegen von ewG artigen Bedingungen der Buffer eine wesentliche Sicherheitsreserve mit Blick auf die Langzeitsicherheit darstellt und daher die Schädigung so gering wie möglich gehalten werden muss.

## 4 Offene Aspekte

BGE-STA muss der GRS Endlagerauslegungen bereitstellen, welche als Grundlage für die Bewertung herangezogen werden können.

## Literaturverzeichnis

- Andra (2005): *Dossier 2005 Argile - Tome "Architecture and management of a geological repository"*. Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs. Châtenay-Malabry, France
- Bracke, G.; Hartwig-Thurat, E.; Larue, J.; Meleshyn, A.; Weyand, T. (2019): *Untersuchungen zu den „maximalen physikalisch möglichen Temperaturen“ gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern*. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Köln
- EndlSiAnfV: Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094)
- K-Drs. 268: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Berlin, 5. Juli 2016
- Nagra (2002): *Project Opalinus Clay – Safety Report*. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate level waste (En-tsorgungsnachweis). NTB 02-05. Nagra. Wettingen/Schweiz
- Posiva Oy & SKB (2017): *Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository*. Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB). Eurajoki (Finland), Stockholm (Sweden)
- Röhlig, K.-J. (2017): *Stellungnahme anlässlich der öffentlichen Anhörung zu dem Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze*. Clausthal, Technische Universität. Berlin
- SKB (2011): *Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark - Volume I*. Main report of the SR-Site project. TR-11-01. Svensk Kärnbränslehantering AB. Stockholm, Sweden
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist